

эффективного медико-технологического процесса. Эти проекции могут быть найдены с использованием современной тепловизионной техники.

Во-вторых, такие системы должны быть снабжены блоками для объективной оценки эффекта анальгезии при выбранном режиме стимуляции.

В-третьих, подсистема стимуляции должна быть самонастраивающейся по сигналам от блока объективного контроля уровня боли.

И, наконец, в-четвертых, система коррекции боли должна включать в себя подсистему биологической обратной связи, которая будет модулировать режимы стимуляции проекций разных отделов головного мозга, связанных с болью. Это необходимо для индивидуализации режимов стимуляции в связи с тем, что восприятие боли может зависеть от психогенных, этнических и культуральных особенностей людей.

УДК 612.821

Е.Н. Винарская, Р.А. Кууз, Г.И. Фирсов

**ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ДИСКРИМИНАНТНО-ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ
СПОСОБНОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ РЕГУЛЯЦИИ ПОЗЫ
В ЗАДАЧАХ КЛИНИЧЕСКОЙ НЕВРОЛОГИИ И СПОРТА**

Основные пути совершенствования метода компьютерной стабильности, направленные на непосредственное его применение в физиологических, психологических и медицинских исследованиях, зависят, в частности, от разработки способов оценки стабильности с позиции теории сигналов и систем. Такой подход требует привлечения достаточно хорошо формализованных способов описания целостной структуры стабильности. В настоящее время известно два основных подхода к анализу стабильности – либо отдельно в сагиттальном и фронтальном направлениях, либо совместно. Первый подход достаточно традиционен, его широко используют при оценке характера стабильностной кривой и ее изменениях при различных патологиях или функциональных нагрузках [1,2]. Второй подход связан как с рассмотрением совместно стабильности в сагиттальном и фронтальном направлениях, так и анализом траектории проекции общего центра давления на плоскость опоры. В последние годы появились работы, в которых к анализу стабильностной информации применяются методы нелинейной динамики, в частности, расчеты корреляционной размерности, ляпуновских показателей, энтропии Шеннона–Колмогорова–Климонтовича [3–8].

В литературе, посвященной анализу процессов регуляции вертикальной позы, неоднократно высказывалось мнение об отсутствии корреляционных связей между сагиттальной и фронтальной составляющими стабильности. Обосновывалось это обычно малыми значениями коэффициента корреляции r . Наши эксперименты показали, что подобное заключение не всегда справедливо, связь между ортогональными составляющими стабильности может быть нелинейной, что не может быть установлено с помощью коэффициента корреляции. Кроме того, корреляционная связь между фронтальной и сагиттальной стабильностями зависит от функционального состояния человека.

Поэтому при обработке стабильности помимо вычисления значений коэффициента корреляции должен выполняться расчет взаимокорреляционной функции, дисперсионного отношения и взаимной дисперсионной функции [9].

Дисперсионное (корреляционное) отношение случайной величины Y относительно X определяется как

$$\eta_{y|x}^2 = \frac{DM(X|Y)}{DY},$$

$$\text{где } DM(Y|X) = M \left[M(Y|X) - M(Y) \right]^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} y \varphi(y|x) dy - m_y \right]^2 \varphi(x) dx \quad - \text{ дисперсия}$$

условного математического ожидания, характеризующая ту часть флуктуаций переменной Y , которая вызвана влиянием переменной X . Дисперсионное отношение $\eta(x,y)$ определяет, в какой мере соблюдается функциональная зависимость между переменными x и y . При $\eta(x,y) \approx 1$ зависимость практически функциональная; чем ближе $\eta(x,y)$ к нулю, тем она больше нарушается. В случае независимости $\eta(x,y) = 0$. В общем случае $0 \leq \eta(x,y) \leq 1$. Дисперсионное отношение $\eta(x,y)$ можно интерпретировать как количественную характеристику меры определенности случайной величины y по значениям случайной величины x . При этом, дисперсионное отношение всегда больше или равно коэффициенту корреляции и не является симметричным, т.е. $\eta(x,y) \neq \eta(y,x)$.

Использование дисперсионного отношения позволяет выявить наличие функциональной связи между колебаниями тела в сагиттальном и фронтальном направлениях, особенно у больных с органическими поражениями ЦНС. Так, для больного А.Б. (диагноз – рассеянный склероз), коэффициент корреляции составил 0,03, а дисперсионное отношение было больше чем на порядок ($\eta = 0,28$). Вместе с тем, при некоторых заболеваниях отличие величины дисперсионного отношения от коэффициента корреляции было сравнительно небольшим, так у больной С.И. (паркинсонизм) при значении коэффициента корреляции 0,72 величина дисперсионного отношения (как во фронтальном направлении по отношению к сагиттальному, так и наоборот, составил примерно 0,73). Такие большие значения η и η свидетельствуют о возможном наличии единого мощного источника колебаний по обеим плоскостям.

Дисперсионное отношение η и коэффициент корреляции γ достаточно полно описывают общую форму статистической безынерционной взаимосвязи двух случайных процессов, подразумевающей отсутствие сдвига во времени (по фазе) между значениями двух связанных процессов. Рассмотрение же динамической системы регуляции позы делает целесообразным обращение к взаимному дисперсионному анализу [9]. Взаимная дисперсионная функция для каждой пары значений t_1, t_2 равна дисперсии условного математического ожидания сечения одной функции x относительно сечения другой функции y сдвинутой на интервал $t_1, -t_2$

$$\begin{aligned} \theta_{yx}(t_1, t_2) &= M \left[M(Y_{t_1} | X_{t_2}) - M Y_{t_1} \right]^2 = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} y_{t_1} \varphi(y_{t_1}; t_1 | x_{t_2}; t_2) dy_{t_1} - \int_{-\infty}^{\infty} y_{t_1} \varphi_y(y_{t_1}; t_1) dy_{t_1} \right]^2 \varphi_x(x_{t_2}; t_2) dx_{t_2}, \end{aligned}$$

где $\varphi(y_{t_1}; t_1 | x_{t_2}; t_2)$ – условная плотность вероятности $Y(t_1)$ относительно $X(t_2)$; $\varphi_y(y_{t_1}; t_1)$ и $\varphi_x(x_{t_2}; t_2)$ – одномерные плотности вероятности случайных функций $Y(t_1)$ и $X(t_2)$.

Как и взаимная корреляционная функция, взаимная дисперсионная функция позволяет оценить величину инерционной статистической связи процессов во времени. Количественной мерой величины этой связи служат коэффициенты максимальной корреляции (и, соответственно, максимального дисперсионного отношения), равные максимальным значениям соответственно взаимной корреляционной или дисперсионной функции. Указанные коэффициенты позволяют оценить степень связанности двух процессов, даже если между ними имеются фазовые сдвиги.

Так, для случая функционального левостороннего гемипареза у больного В.В. при значении коэффициента корреляции при стоянии с закрытыми глазами 0,0677 максимальный коэффициент корреляции составил 0,4448, что говорит о наличии определенной линейной инерционной статистической связи колебаний во фронтальной и сагиттальной плоскостях. При этом у здоровых обследуемых различие в величинах дисперсионного отношения максимального дисперсионного отношения очень мало, не более 10–15%.

При некоторых видах неврологических патологий наблюдается возбуждение взаимосвязанных колебаний центра тяжести, в том числе при неврозах и истерии [10]. Об этом может свидетельствовать замеченная нами высокая степень когерентности колебаний на стабилотограммах в сагиттальной и фронтальной плоскостях в достаточно широких частотных диапазонах (от 4 до 8 Гц).

Большое значение функции когерентности свидетельствует о наличии сильной линейной инерционной статистической связи колебаний в двух плоскостях и может быть объяснено либо существованием единого мощного источника колебаний в ЦНС, либо синхронизацией колебаний в сагиттальной и фронтальной плоскостях. Выявленный феномен может быть проявлением нарушения программирования регуляции равновесия вертикальной позы и заинтересованности систем, отвечающих за это программирование, в частности, лобных отделов. В частности, возможным механизмом, обуславливающим появление площадок функции когерентности, выступает электрическая деятельность мозга, проявляющаяся в тета-ритме ЭЭГ с частотой 4–7 Гц и амплитудой в десятки мкВ, при этом выраженность тета-ритма зависит от степени эмоционального, умственного напряжения, фона основной активности и возраста. Существующая взаимосвязь между активностью тета-ритма и умственным напряжением, эффективностью деятельности объясняется тем, что тета-ритм отражает активность срединно-стволовых образований головного мозга и является электрофизиологическим коррелятором механизма, квантующим поток извлекаемых из памяти энграмм.

Для оценки связанности колебаний в сагиттальной и фронтальной плоскостях весьма перспективно использование взаимной обобщенной информации, подробно рассмотренное в работе [5].

Для количественной оценки степени различия стабилотограмм, в которых проявляется системная организация целенаправленной деятельности человека-оператора, нами использовались некоторые показатели степени хаотичности процессов перемещения центра тяжести человека, зафиксированные в стабилотограммах. В частности, рассматривалось применение физической энтропии Больцмана–Шеннона [6], которая может быть вычислена по одной экспериментальной реализации, для выявления изменений в состоянии человека. Энтропия является относительной характеристикой, поэтому она не может быть использована при диагностике состояния различных людей. Однако ее удобно использовать для слежения за изменением состояния человека при предъявлении ему различных тестовых задач, т.е. для решения задачи мониторинга.

Кроме шенноновской энтропии эффективным представляется использование энтропийного коэффициента плотности распределения вероятности $K_H = 0,5 \exp[I_{ш}(n)]\sigma^{-1}$, где $I_{ш}(n)$ – энтропия плотности распределения вероятностей (информация по Шеннону), а σ – стандартное отклонение. Зная гистограмму плотности распределения вероятности мгновенных значений стабилотограммы, энтропийный коэффициент может быть определен

по формуле $K_H = \frac{bN}{2\sigma} 10^{-1/N} \sum_{i=1}^d n_i \lg n_i$, где b – ширина столбца гистограммы, N – объем выборки, σ – СКО, d – число столбцов гистограммы, n_i – число наблюдений в i -м столбце. При этом для любых законов распределения величина КН лежит в пределах $0 \div 2,066$, причем максимальное значение КН – 2,066 имеет гауссово распределение, а, например,

арксинусоидальному распределению соответствует значение $KH = 1,11$.

Другим подходом к оценке гистограммных характеристик стабилотрамм является использование как коэффициента эксцесса k_ε , изменяющегося от 1 до ∞ , так и контрэксцесса $k = k_\varepsilon^{-1}$, значение которого может меняться в пределах от 0 до 1. Рассеяние оценки контрэксцесса k приближенно аппроксимируется формулой

$$\delta(k) = \sigma(k) / k \approx \sqrt[4]{(\varepsilon^2 - 1)^3} / \sqrt{29N}$$

где ε – эксцесс распределения, а рассеяние оценок энтропийного коэффициента KH может быть найдено из соотношений $\sigma(K_H) = 0,9 / (kK_H (K_H N)^{0,5})$ и $\delta(K_H) = \sigma(K_H) K_H^{-1} = 0,9 / (kK_H^2 (K_H N)^{0,5})$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гурфинкель В.С., Коц Я.М., Шик М.Л. Регуляция позы человека. – М.: Наука, 1965. – 256 с.
2. Скворцов Д.В. Клинический анализ движений. Стабилотметрия. – М.: АОЗТ "Антидор", 2000. – 192 с.
3. Розенблюм М.Г., Фирсов Г.И. Стохастические автоколебания в системе регуляции вертикальной позы тела человека. I. Стратегия управления позой и динамическая модель // Биомеханика (София). Т. 24. – 1992. – С.34-41. II. Модельный и натурный эксперимент // Биомеханика (София). Т. 25. – 1992. – С.37-43.
4. Firsov G.I., Rosenblum M.G., Landa P.S. Deterministic 1/f fluctuations in biomechanical system // Noise in physical systems and 1/f fluctuations. – New York: AIP Press, 1993. – P. 716–719.
5. Rosenblum M.G., Firsov G.I., Kuuz R.A., Pompe B. Human Postural Control – Force Plate Experiments and Modelling // Nonlinear Analysis of Physiological Data. / Ed. by H.Kantz, J.Kurths and G.Mayer-Kress. – Berlin: Springer, 1998. – P. 283–306.
6. Винарская Е.Н., Кууз Р.А., Розенблюм М.Г., Фирсов Г.И. Методы нелинейной динамики в задачах оценки функционального состояния человека // Известия ТРТУ. Медицинские информационные системы. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000, № 4 (18). – С. 7 – 10.
7. Кононов А.Ф., Слива С.С. Применение методов нелинейной динамики для анализа системы поддержания вертикальной позы человека // Российский журнал биомеханики. 2000. – № 2. – С. 70.
8. Колесников А.А., Слива С.С., Кононов А.Ф. Аналитическое конструирование агрегированных регуляторов: синергетическое управление биомеханическими системами // Управление и информационные технологии. Том. 1. – СПб.: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2003. – С. 42–46.
9. Райбман Н.С., Капитоненко В.В., Овсепян Ф.А., Варлаки П.М. Дисперсионная идентификация / Под ред. Н.С. Райбмана. – М.: Наука, 1981. – 336 с.
10. Кууз Р.А., Фирсов Г.И. Применение методов компьютерной стабилотметрии для решения задач функциональной диагностики в неврологии // Биомедицинская радиоэлектроника. 2001. – № 5–6. – С. 2433.

УДК 612.821

И.Н. Статников, Г.И. Фирсов

ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОСПРИЯТИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ВИБРОТАКТИЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ЧЕЛОВЕКОМ-ОПЕРАТОРОМ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Исследования сложных биомеханических систем класса человек-оператор, находя-